

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2023.01.018

聚酰亚胺薄膜湿热老化性能研究

陶君

(上海慧检测技术有限公司, 上海 201206)

摘要: 由于聚酰亚胺(PI)材料的电绝缘性在受到湿热老化的破坏后会出现性能下降的趋势,因此有必要对湿热老化的PI材料的电学性能等进行探究,进而对其性能变化进行合理的分析和解释。通过85℃和85%湿度老化(双85老化)研究和分析了聚酰亚胺薄膜在不同湿热老化时间下的力学性能和电绝缘性能的变化规律。结果表明:PI材料断裂伸长率随湿热老化时间的增加,在360 h以前下降幅度较大,随后下降缓慢;介质损耗因数随着湿热老化时间的增加呈增大趋势;击穿场强随着湿热老化时间的增加逐渐降低,而湿热老化600 h和720 h样品的击穿场强降低幅度较大;热失重分析结果表明,初始分解温度、最大分解温度和残炭量均呈下降趋势,但降低幅度较小。

关键词: 聚酰亚胺;湿热老化;介电频谱;击穿场强;力学性能

中图分类号: TQ320.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2023)01-0098-06

Study on Hygrothermal Aging Properties of Polyimide Films

Tao Jun

(Shanghai Intelligent Service and Technology Co. Ltd., Shanghai 201206, China)

Abstract : The electric properties of polyimide (PI) would deteriorate with time under the condition of hydrothermal aging. Therefore, it is necessary to explore the electrical properties of the PI materials at varied aging conditions, and then make reasonable analysis and explanation of their changes. As revealed, the mechanical properties and electrical insulation properties of PI materials under different hydrothermal aging time (85 °C and 85% humidity) were studied and analyzed. The results show that the elongation at break decreases greatly before 360 h and then slowly with the aging time increases. The dielectric loss factor increases with the increase of hydrothermal aging time, which is in consistent with trend of the breakdown field strength. Besides, the breakdown field strength decreases greatly when the aging time at 600 h and 720 h. Furthermore, the results of thermogravimetric analysis indicates that the initial decomposition temperature, maximum decomposition temperature and carbon residue decrease slightly with the aging time prolong.

Keywords : polyimide ; hygrothermal aging ; dielectric frequency spectrum ; breakdown field strength ; mechanical property

聚酰亚胺(PI)是一类主链上含有酰亚胺环结构的聚合物材料,它由二元酸和二元胺缩聚而成,分子中含有非常稳定的芳杂环结构单元,独特的结构使其具有优异的力学性能、耐高温性能、介电性能、耐辐射性能以及耐溶剂性能等,因此在电缆绕包绝缘、电子产品等领域得到广泛应用^[1-3]。此外,PI薄膜还以其优异的综合优异性能在微电子工业应用中受到广泛的关注^[4]。

在电子元器件加工过程中,PI薄膜通常需要粘结或复合到其他金属或无机材料上,如铜箔、硅片

及光学玻璃等,并承受苛刻的高温制备条件及多次高低温高低湿度冷热循环^[5]。为了确保光电器件的质量,柔性PI薄膜应具有优异的耐湿热性和电绝缘性,但是到目前为止针对湿热老化后PI薄膜的绝缘性能研究还相对较少。但是根据现有研究表明,湿热老化通常会对材料的绝缘性能产生一定的影响。李亚丰等^[6]研究了环氧树脂材料在湿热环境下性能变化,讨论了环氧树脂吸湿后质量、玻璃化转变温度和绝缘性能等,并对湿热老化机理进行分析。发现湿热老化温度升高提高了环氧树脂的平衡状态

通信作者: 陶君,中级工程师,主要研究方向为材料老化研究

收稿日期: 2022-10-06

引用格式: 陶君. 聚酰亚胺薄膜湿热老化性能研究[J]. 工程塑料应用, 2023, 51(1): 98-103.

Tao Jun. Study on hygrothermal aging properties of polyimide films[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(1): 98-103.

吸湿量,导致介电性能下降。李森林等^[7]认为通信电缆交联聚乙烯材料的耐湿热性能对通信电缆的使用寿命存在显著影响,并提出一种通信电缆交联聚乙烯材料耐湿热性能研究方法,通过水煮模拟湿热老化环境,依次测试两种通信电缆交联聚乙烯材料耐湿热性能。综上所述,湿热老化对材料的性能影响较为明显,PI薄膜材料的电绝缘性也极有可能受到湿热老化的破坏,因此有必要对湿热老化的PI的电学性能进行探究,对其性能变化进行合理的分析和解释^[8-9]。

笔者采用一种商用PI薄膜作为研究对象,在湿度85%、温度85℃的氛围下对其进行不同时间的湿热老化,然后对老化后的样品进行测试和分析。利用万能试验机对样品的力学性能进行测试,使用介质谱分析仪、交流介质强度试验仪、高阻计对样品的介电强度、介质损耗等电性能进行测试,并通过热重分析仪对样品的热稳定性和耐热性进行测试和研究,进而分析湿热老化对PI薄膜性能的影响。

1 实验部分

1.1 主要原材料

PI薄膜:厚度0.15 mm,上海特翔电器绝缘材料有限公司。

1.2 仪器设备

微机控制电子万能试验机:ETM-A型,深圳万测试验设备有限公司;

介质谱分析仪:IDAX300型,美国Megger公司;

交流介质强度试验仪:ADT-5/50型,上海蓝波高电压技术设备有限公司;

高阻计:ZC-36型,上海第六电表厂有限公司;

热重(TG)分析仪:TG 209 F3型,德国耐驰公司。

1.3 试验过程

将PI薄膜裁成哑铃型和直径为100 mm的圆片,放入湿热老化箱中,在湿度85%、温度85℃下老化不同时间。

1.4 测试与表征

力学性能测试:按照GB/T 1040.1-2018对材料的拉伸强度及断裂伸长率进行测试,样品规格为4 mm×75 mm哑铃,厚度0.15 mm,拉伸速率为200 mm/min。

吸水量测试:称取一定量样品放于TG仪上进

行测试,首先将温度升至50℃保留3 min然后升温至不再出现失重(约至250℃),将测试曲线扣除未老化样品的曲线。

介电性能:按照GB/T 1409-2016进行测试,所用样品规格与体积电阻率性能测试用样品一致,测试温度为25℃,频率为0.01~1 000 Hz。

击穿电压:按照GB/T 1408-2016进行测试,老化不同时间后的圆形片材在交流介质强度试验仪上进行测试,记录击穿时的介电强度,样品规格为直径为100 mm且厚度为0.15 mm的圆形。

体积电阻率:按照GB/T 1410-2016进行测试,样品规格为直径为100 mm且厚度为0.15 mm的圆形,测试温度为25℃,测试电压为1 000 V。

热稳定性:按照GB/T 27761-2011对试样进行热失重测试。测试条件:室温升温至700℃,升温速率为20℃/min,氮气氛围。

2 结果与讨论

2.1 含水量

图1是不同湿热老化时间下PI薄膜水含量变化曲线图。从图1可以看到,720 h内所有湿热老化样品的含水率均低于0.4%,当升温至250℃时,水含量趋于0%;随老化时间的增加,在360 h以前水含量增加幅度较大,360 h至720 h之间,水含量增加速率减慢。这是因为老化前期(360 h以前)PI膜表面吸附水较快,湿热老化360 h至720 h之间吸水逐渐达到平衡。另外,从图1可推断湿热老化后的PI薄膜的结合水分子在250℃可以脱除。

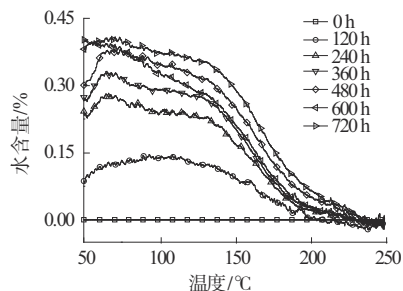


图1 不同湿热老化时间下PI薄膜水含量变化曲线图

2.2 力学性能

图2是PI薄膜样品在不同湿热老化时间下的断裂伸长率和断裂强度变化曲线图。由图2可知,断裂伸长率随老化时间的增加,在360 h以前下降幅度较大,从105%下降至30%,随后老化时间增加至720 h,断裂伸长率下降至22%。这是因为老化前期(360 h以前)PI膜表面吸附水较快,水解速率也较

快,从而表面因水解造成应力缺陷,所以断裂伸长率下降较快;360 h以后,PI膜表面层吸水逐渐达到平衡所以断裂伸长率下降也较为平缓。图2中,拉伸强度随着湿热老化时间增加而下降,下降幅度较小,从115 MPa下降至99 MPa,影响PI断裂强度的主要因素是PI分子链的缠绕程度,在湿热老化过程中因PI薄膜水解发生在表面,分子链之间形成的物理交联点破坏程度较轻或没有被破坏,因此对整个薄膜分子链的缠绕程度影响不大,所以断裂强度下降幅度不大^[10-11]。

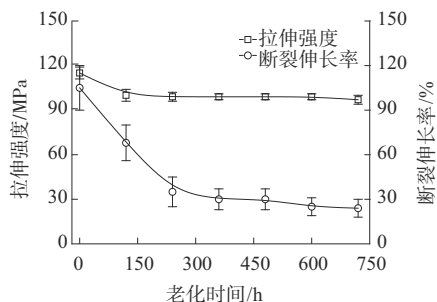
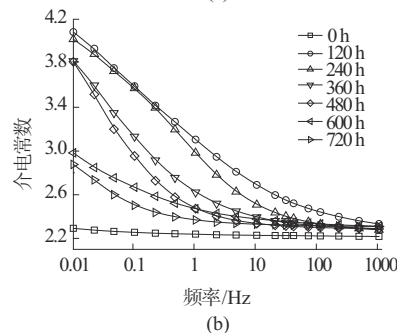
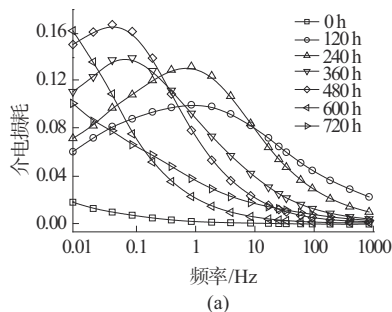


图2 不同湿热老化时间下PI薄膜力学性能变化曲线图

2.3 介电频谱

图3为不同湿热老化时间下样品的介电频谱。不同湿热老化时间下的PI薄膜样品的介质损耗因数(Tanδ)随频率的变化曲线如图3a所示。从图3a中可以看出,随着湿热老化时间的增加,在低频区PI薄膜样品的介电损耗呈逐渐增加的趋势,这是因为随着湿热老化时间的增加,样品的吸水率也随



a—介电损耗;b—介电常数

图3 不同湿热老化时间下PI薄膜的介电频谱

之增加,薄膜内部的载流子增加使得电导损耗增加,同时空间电荷极化增强,产生能量损耗。在 $10^2 \sim 10^3$ Hz之间有一个介质损耗因数峰值,且该峰值随着湿热老化时间的增加向低频率移动。这是因为在 $10^2 \sim 10^3$ Hz之间发生的是偶极子弛豫损耗,在湿热老化过程中,PI分子先是吸附水分子,进而使PI分子发生水解,水解后的PI分子极性增加,又能与水分子缔合,所以随着水解的增加偶极子弛豫损耗向低频移动^[12]。

介电常数是表征绝缘材料电性能的一个重要参数,图3b是不同湿热老化时间下的PI薄膜样品的介电常数随频率的变化曲线图。从图3b可知,未湿热老化的PI样品介电常数最小,湿热老化后的样品介电常数低频区变化明显,其中湿热老化120 h的样品介电常数最大,随着湿热老化时间的增加介电常数降低。这可能是120 h时,水分子与PI分子之间以物理吸附为主,分子偶极矩和可极化性大大增加介电常数随之也最大(水的介电常数较大,10 °C时为83.8),随着湿热老化时间增加,PI分子发生水解并与水分子缔合,介质的可极化性降低,从而介电常数也降低^[13]。

2.4 工频击穿特性

电介质的击穿存在一定概率分布,一般采用Weibull分布进行击穿数据的统计分析,得到击穿数据的概率分布曲线,击穿场强的概率分布函数可以由式1表示。

$$P_f(E_b; \alpha, \beta) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{E_b}{\alpha}\right)^\beta\right] \quad (1)$$

式中, E_b 为试样击穿场强的实验值,kV/mm, α 为击穿概率63.2%的击穿场强,也被称为尺度参数,是实验试样的特征击穿场强,kV/mm; β 是表征击穿场强概率分布的形状参数,代表击穿数据的分散性; P_f 为概率分布函数,可以表示为式(2)^[14]:

$$P_f(i, n) = \frac{i - 0.44}{n + 0.25} \times 100\% \quad (2)$$

对式(1)取两次对数,可得到式(3):

$$\ln\left\{\ln\left[1/[1 - P_f(E_b, \alpha, \beta)]\right]\right\} = \beta \ln E_b - \beta \ln \alpha \quad (3)$$

从式(3)中可以看到,等式的左边项与击穿场强的对数存在直线关系,将实际测试得到的击穿场强数据经式(2)和式(3)处理后绘制于图4中。由图4可以看出,X轴从左至右依次为湿热老化不同时间下的PI样品。该结果表明击穿场强最大的为未老化的PI样品,而湿热老化120,240,360,480 h样品击

穿场强降低的幅度却不大。而湿热老化 600 h 和 720 h 样品的击穿场强降低幅度较大。其原因是随着湿热老化时间的增加,PI 分子链发生了水解,生成了极性基团,同时随着湿热老化时间的进一步增加,PI 分子链发生了断裂,形成了微小区域内的绝缘缺陷陷阱,所以湿热老化前期击穿场强变化较小,湿热老化后期降低较为显著^[15]。

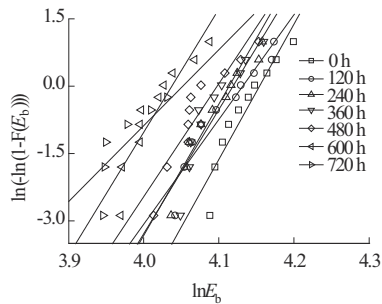


图4 PI样品击穿场强 Weibull统计分布

从击穿电压的 Weibull 分布可以得到材料的形状参数 β 和尺度参数 α ,不同湿热老化时间试样的形状参数和尺度参数见表1。形状参数 β 决定了试样击穿强度数据的分散性的大小。 β 越大,表示击穿数据分散性越小。从表1可以看出,湿热老化后的样品的形状参数 β 值均小于未湿热老化的,其中湿热老化 720 h 样品的形状参数 β 值远小于未湿热老化样品的值,说明 720 h 湿热老化样品击穿强度数据的分散性较大。尺度参数为击穿概率 63.2% 的击穿场强,表1中显示湿热老化后的样品的尺度参数 α 值均小于未湿热老化的,说明湿热老化后的样品耐击穿强度降低^[16]。

表1 样品形状参数和尺度参数

老化时间/h	形状参数	尺度参数/(kV·mm ⁻¹)
0	30.163 15	63.664 7
120	23.356 17	62.258 07
240	27.666 91	61.459 33
360	29.284 69	61.141 02
480	25.199 36	60.177 33
600	27.452 31	56.657 02
720	16.931 09	57.488 10

2.5 体积电阻率

表2是PI样品在湿热条件下老化不同时间后体积电阻率的变化,从表2中可以看出,随着老化时间的增加,样品的体积电阻率几乎未发生变化。这是因为在聚合物中,主要是离子电导,PI虽然在湿热老化过程中表面发生了水解,产生了极性的离子,但这些极性的离子无法迁移到样品深处,因此对体积电阻率影响不大。

表2 不同湿热老化时间下PI体积电阻率 ($\times 10^{14} \Omega \cdot m$)

0 h	120 h	240 h	360 h	480 h	600 h	720 h
3.8	3.1	3.5	3.0	3.5	3.1	3.5

2.6 热稳定性

为考察不同湿热老化时间PI样品的热性能,对湿热老化 0 h、360 h 和 720 h 的样品进行TG测试,测试结果如图5所示。

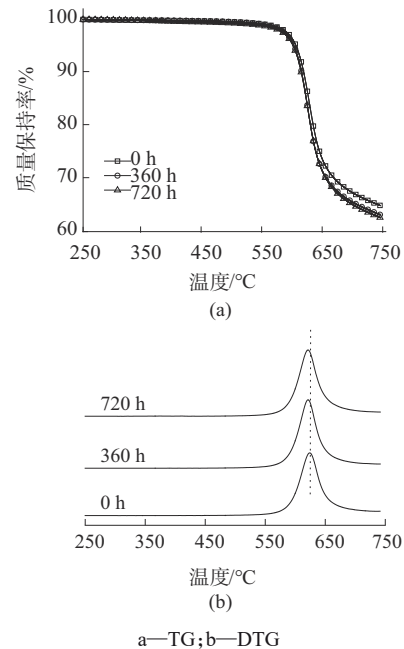


图5 不同湿热老化样品的TG曲线图

从图5a可以看到,730 °C时样品的残炭量随湿热老化时间逐渐降低,从图5b可以看到最大分解温度逐渐降低。定义热失重率在 5% ($T_{5\%}$) 和 10% 时 ($T_{10\%}$) 的温度为初始分解温度,同时将TG曲线分析得到的数据列于表3。

表3 TG分析数据

老化时间/h	$T_{5\%}/^{\circ}\text{C}$	$T_{10\%}/^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{max}}/^{\circ}\text{C}$	残炭率/%
0	601.8	614.5	624.2	64.9
360	598.4	611.1	621.3	63.2
720	597.2	610.6	621.3	62.6

从表3中数据可以看到, $T_{5\%}$ 从 601.8 °C 下降至 597.2 °C, $T_{10\%}$ 从 614.5 °C 下降至 610.6 °C, 最大分解温度(T_{max})从 624.2 °C 下降至 621.3 °C, 730 °C 时样品的残炭量从 64.9% 下降至 62.6%; 初始分解温度、最大分解温度和残炭率均下降,但降低幅度较小,可推断主要是表面水解为主,而造成热失重参数小幅度下降。

2.7 湿热老化机理探讨

通过以上结果推断可能的反应机理如图6所示。首先,PI分子链吸附 H_2O 分子,这是一个物理

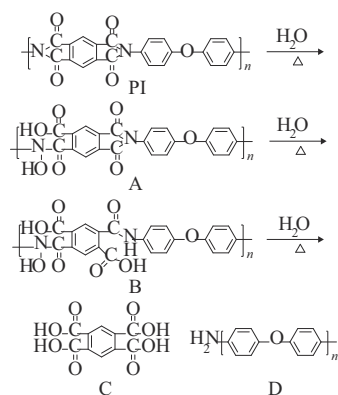


图6 PI水解反应式

吸附的过程;然后水分子与PI分子发生一步水解生成产物A;产物A进一步水解,生成产物B;产物B发生更深一步水解,生成完全水解产物C和D。PI分子在碱性环境中才会容易发生完全水解,本实验采用的是中性水作为湿热环境的水分,所以更大概率的反应中间产物为A和B,1 mol的A又可以和1 mol的H₂O以氢键形式缔合,1 mol的B又可以和2 mol的H₂O以氢键形式缔合(如图7所示)。由于水解发生在表面层,虽然含水量不高,但对PI的电绝缘性能影响较大^[17-18]。

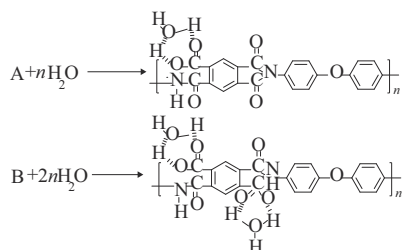


图7 水分子缔合反应式

3 结论

研究了PI薄膜在85℃和85%湿度条件下的老化情况,分析了PI薄膜在不同湿热老化时间下的力学性能和电绝缘性能。得出如下结论:

(1) 随湿热老化时间的增加,PI薄膜的断裂伸长率呈现先快速下降,后下降幅度降低的趋势,当老化时间达到360 h后,断裂伸长率从105%降低至30%,而拉伸强度变化较小。

(2) 湿热老化使得样品初始分解温度、最大分解温度和残炭率均出现下降趋势,但降低幅度较小。

(3) 随着湿热老化时间增加,PI薄膜的介质损耗逐渐增加;同时,其击穿场强逐渐降低,尤其是湿热老化600 h和720 h后,薄膜的击穿场强降低幅度明显,分别降低至56.6,57.5 kV/mm;此外,湿热老化对

薄膜的体积电阻率影响不大。

参考文献

- [1] 刘畅,卞伟杰,张兴,等.宽频高压脉冲参数对聚酰亚胺薄膜局部放电特性的影响[J].电力工程技术,2021(5):121-127.
Liu Chang, Bian Weijie, Zhang Xing, et al. Effects of broadband high-voltage pulse parameters on the partial discharge characteristics of polyimide film[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021(5):121-127.
- [2] Ainur Y, Wang Y, Ghanem B S, et al. Gas separation performance of solid-state in-situ thermally crosslinked 6FDA-based polyimides[J]. Journal of Membrane Science, 2022, 641. DOI: 10.1016/j.memsci.2021.119885.
- [3] Luo Y F, Ni L, Zhang C, et al. Fabrication of hollow polyimide microspheres with controllable sizes[J]. Macromolecular Chemistry and Physics, 2021, 222(19):236-239.
- [4] 陈品权,蒋漾漾,吴礼光,等.固载纳米银的聚酰亚胺混合基质膜的制备及其渗透汽化分离苯的性能[J].浙江化工,2021,52(9):37-42.
Chen Pinquan, Jiang Yangyang, Wu Liguang, et al. Preparation of polyimide mixed matrix membrane immobilized with nano-silver and its performance for pervaporation separation of benzene[J]. Zhejiang Chemical Industry, 2021, 52(9):37-42.
- [5] 徐自超,张得昆,吴江伟,等.高强度PP/PI非织造布用基布的制备工艺优化[J].纺织高校基础科学学报,2021(3):7-13.
Xu Zichao, Zhang Dekun, Wu Jiangwei, et al. Preparing technology optimization of base fabric for high strength PP/PI nonwoven roller[J]. Basic Sciences Journal of Textile Universities, 2021(3):7-13.
- [6] 李亚丰,姚学玲,孙晋茹,等.绝缘封装用环氧树脂固化物的湿热老化特性[J].高电压技术,2021,47(10):3 600-3 607.
Li Yafeng, Yao Xueling, Sun Jinru, et al. Hydrothermal aging characteristics of cured epoxy resin for insulation encapsulation[J]. 2021, 47(10), 3 600-3 607.
- [7] 李森林,何凯,刘宇舜,等.通信电缆交联聚乙烯材料耐湿热性能研究[J].合成材料老化与应用,2020,49(5):73-75.
Li Senlin, He Kai, Liu Yushun, et al. Study on heat and moisture resistance of XLPE for communication cable[J]. Synthetic Materials Aging and Application, 2020, 49(5):73-75.
- [8] 孙国华,张信,武德珍,等.高性能聚酰亚胺复合材料的研究进展[J].中国塑料,2021,35(9):147-155.
Sun Guohua, Zhang Xin, Wu Dezhen, et al. Research progress in high-performance polyimide composites[J]. China Plastics, 2021, 35(9):147-155.
- [9] 孟硕,汪泽幸,朱文佳,等.聚酰亚胺/棉/氨纶针织弹力面料的制备及性能研究[J].湖南工程学院学报(自然科学版),2021,31(3):78-82.
Meng Shuo, Wang Zexing, Zhu Wenjia, et al. Investigation on preparation and performance of cotton/polyimide/spandex knitted elastic fabric[J]. Journal of Hunan Institute of Engineering(Natural

- Science Edition), 2021, 31(3):78–82.
- [10] 曲程科. 共聚型全芳香聚酰胺的合成及其与聚酰亚胺的复合改性[J]. 化学研究, 2021, 32(5):445–451.
- Qu Chengke. Synthesis of aromatic polyamide copolymers and their compound modification with polyimide[J]. Chemical Research, 2021, 32(5):445–451.
- [11] 周海峰, 田国峰, 武德珍. 高强PI纤维增强耐温光缆应力特性仿真分析[J]. 光纤与电缆及其应用技术, 2021(5):6–9, 25.
- Zhou Haifeng, Tian Guofeng, Wu Dezhen. Simulation analysis of stress characteristics of high-strength PI fiber reinforced temperature resistant optical cable[J]. Optical Fiber & Electric Cable and Their Applications, 2021(5):6–9, 25.
- [12] 陈钰玮, 简凌峰, 翁梦蔓, 等. 聚酰亚胺介电性能改性的研究进展[J]. 绝缘材料, 2021, 54(9):9–14.
- Chen Yuwei, Jian Lingfeng, Weng Mengman, et al. Research progress on dielectric properties modification of polyimide[J]. Insulating Materials, 2021, 54(9):9–14.
- [13] 袁标, 石雅珂, 陈赞. 化学交联聚酰亚胺隔膜增强锂离子电池性能研究[J]. 无机盐工业, 2021, 53(11):42–48, 54.
- Yuan Biao, Shi Yake, Chen Zan. Study on chemically crosslinked polyimide separators for lithium-ion batteries with enhanced performance[J]. Inorganic Chemicals Industry, 2021, 53(11):42–48, 54.
- [14] Dissado L A, Fothergill J C. Electrical degradation and breakdown in polymers[M]. Tehran: The Institution of Engineering and Technology, 1992.
- [15] 李清玲, 刘存生, 翁梦蔓, 等. 耐电晕聚酰亚胺薄膜研究进展[J]. 绝缘材料, 2021, 54(8):1–7.
- Li Qingling, Liu Cunsheng, Weng Mengman, et al. Research progress of corona resistant polyimide films[J]. Insulating Materials, 2021, 54(8):1–7.
- [16] 高梦岩, 王畅鸥, 贾妍, 等. 导热聚酰亚胺绝缘薄膜材料的研究进展[J]. 绝缘材料, 2021, 54(6):1–9.
- Gao Mengyan, Wang Changou, Jia Yan, et al. Research progress in thermally conductive and insulating polyimide films[J]. Insulating Materials, 2021, 54(6):1–9.
- [17] Wang R, Duan X S, Yao J W, et al. Processing – structure – property relationship in direct laser writing carbonization of polyimide[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2020, 137(34). DOI: 10.1002/app.48978.
- [18] 雷毅鑫, 吴广宁, 杨雁, 等. 纳米 Al_2O_3 对聚酰亚胺薄膜受潮后绝缘性能的影响机制[J]. 高电压技术, 2019, 45(10):3 231–3 239.
- Lei Yixin, Wu Guangning, Yang Yan, et al. Effect of Al_2O_3 nanoparticles on insulation properties of polyimide films after damp[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(10):3 231–3 239.

(上接第97页)

- [12] 刘旭宇, 曾发林, 李建康, 等. 大客车后视镜振动性能预测与结构优化[J]. 重庆理工大学学报: 自然科学, 2017, 31(12):47–52.
- Liu Xuyu, Zeng Falin, Li Jiankang, et al. Vibration performance prediction and structure optimization of passenger vehicle rear-view mirror[J]. Journal of Chongqing University of Technology: Natural Science, 2017, 31(12):47–52.
- [13] 王转. 聚合物ABS的应力疲劳性能与交变应力频率的关系[J]. 贵州大学学报: 自然科学版, 2013, 30(4):114–118.
- Wang Zhuan. Stress-fatigue properties of polymeric ABS as a function of alternating stress frequency[J]. Journal of Guizhou University: Natural Sciences, 2013, 30(4):114–118.
- [14] 张华龙, 张二红, 苏海洋, 等. 八次复合抽芯的进气歧管盖注塑模具设计[J]. 塑料工业, 2022, 50(2):87–92.
- Zhang Hualong, Zhang Erhong, Su Haiyang, et al. Injection mold design of intake manifold cover with eight times composite core pulling[J]. China Plastics Industry, 2022, 50(2):87–92.
- [15] 张维合, 冯国树, 朱晓敏, 等. 汽车右后门板顺序阀热流道大型薄壁注塑模具设计[J]. 中国塑料, 2022, 36(1):166–171.
- Zhang Weihe, Feng Guoshu, Zhu Xiaomin, et al. Design of large and thin-walled injection mold with SVG for car right-tuer hinten[J]. China Plastics, 2022, 36(1):166–171.
- [16] 王巍, 张贺, 李珍, 等. 机载计算机卡钩注塑模具设计[J]. 塑料, 2022, 51(2):43–46.
- Wang Wei, Zhang He, Li Zhen, et al. Design of injection mold for airborne computer hook[J]. Plastics, 2022, 51(2):43–46.
- [17] 张世阳, 陈荣创, 高广宇, 等. 商用车外视镜镜框注塑模具设计[J]. 工程塑料应用, 2021, 49(10):93–97.
- Zhang Shiyang, Chen Rongchuang, Gao Guangyu, et al. Injection mould design of rear view mirror frame for commercial vehicle[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(10):93–97.